

履歴型制震ダンパーの累積塑性変形 CID と累積疲労損傷度 D —相互比較と載荷プログラム規定(Loading protocol)—

名城大学 名誉会員 宇佐美勉

1. まえがき

橋梁の耐震性能向上策として、制震ダンパーを設置する「制震橋」の考えが主流になりつつある。履歴型制震ダンパーに対しては、高い変形性能に加え、高い低サイクル疲労性能の確保が要求される。低サイクル疲労性能照査は、累積塑性変形 (CID) と累積疲労損傷度 (D) による方法がある^{1)~4)}が、それらの定量的な相互比較、ならびに CID の限界値を求めるための載荷プログラム規定 (Loading protocol) は土木分野では明確にされていない。本報告は、土木構造物に適した高機能座屈拘束ブレース (BRB) を取り上げ、それらの検討と提案を行う。

2. 高機能 BRB 制震ダンパーの性能照査式

高機能 BRB ダンパーの性能照査は、L2 地震動に対して次の照査式を満足するように行われる¹⁾。

【変形性能】

$$\gamma_1 \cdot \varepsilon_{\max} \leq \varepsilon_u \quad (1)$$

【低サイクル疲労性能-その 1 (CID 法)】

$$\gamma_2 \cdot CID \leq (CID)_{\lim} \quad (2a, b)$$

$$CID = \sum_{i=1}^n |\varepsilon_{pi}|$$

【低サイクル疲労性能-その 2 (D 法)】

$$\gamma_2 \cdot D \leq 1.0 \quad (3a, b)$$

$$D = C \cdot \sum_{i=1}^{nc} (\Delta \varepsilon_i)^m$$

式(1),(2a),(3a)の左辺は複合非線形地震応答解析によって求められる応答値(Demand), 右辺は制震ダンパーの性能の限界値(Capacity)である。ここで、 γ_1, γ_2 =部分係数、 $\varepsilon_{\max}$ =BRB の最大応答軸ひずみ、 ε_u =限界軸ひずみ、 ε_{pi} =各サイクルにおける応答軸ひずみの塑性成分、

$CID = \varepsilon_{pi}$ の絶対値の総和で累積塑性変形の応答値 (図-1)、 $(CID)_{\lim}$ =累積塑性変形の限界値、 D =累積疲労損傷度、 $\Delta \varepsilon_i$ =全ひずみ範囲 (正負の軸ひずみ振幅 $\pm \varepsilon_i$ の和、図-2)、 nc =全サイクル数を表す。軸ひずみの応答値および限界値は、芯材の塑性化部分両端の相対軸変位を塑性化部材長で除した平均ひずみを表し、軸ひずみの「軸」を省略する。

式 (3b) の累積疲労損傷度 D は BRB 芯材の Manson-Coffin 則に基づく低サイクル疲労寿命 N_f の算定式

$$N_f = C^{-1} \cdot (\Delta \varepsilon)^{-m} \quad (4)$$

から Miner 式を適用して求められたものである^{1)~4)}。式(1)~(4)中の定数の値を表-1 に示す。

3. BRB の累積塑性変形 (CID) と累積疲労損傷度 (D) の関係

BRB の低サイクル疲労照査は、式(2a)の CID あるいは式(3a)の D のいずれかで行われる。CID 法は、BRB の損傷に寄与するのは主として塑性ひずみ成分であるという考えから、式(1)の限界ひずみ ε_u に至るまでの応答塑性ひずみの総和を用いて照査を行う。右辺の $(CID)_{\lim}=0.7$ は、BRB を対傾構および横構に設置した上路式鋼アーチ橋に橋軸直角方向に L2 地震動が 3 回連続して作用したときの最大 CID 値を元に定められた限界値¹⁾である。従って、 $(CID)_{\lim}$ は

キーワード：座屈拘束ブレース、性能照査法、低サイクル疲労、載荷プログラム規定

連絡先：〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501 名城大学総合研究所 TEL 052-838-2363

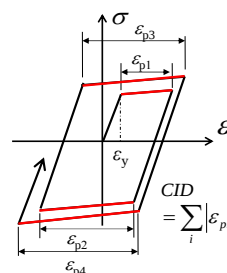


図-1 累積塑性変形(CID)

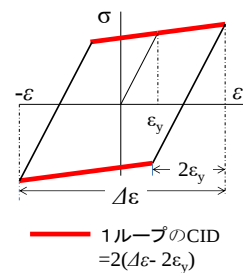


図-2 1ループのCID

表-1 式(1)~(4)の定数の値

γ_1	γ_2	ε_u	$(CID)_{\lim}$	平均値 ^{2),3)}		下限値 ^{1),4)}	
				C	m	C	m
1.5	3.0	0.03	0.7	18.5	1.95	28.2	2.05

表-2 提案載荷プログラム規定(CID) (単位: %)

Load No.	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
ε	$\pm \varepsilon_y$	± 0.5	± 1.0	± 1.5	± 2.0	± 2.5	± 3.0
$\Delta \varepsilon = 2\varepsilon$	$2\varepsilon_y$	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
No. of cycles	uniform-loading $n_0=0,1,2,3$ or 4						n_0+n_m

Note: 総サイクル数 (n_t) = $7n_0 + n_m$, n_m =付加サイクル数

必ずしも BRB の破断を意味するのではなく、許容される損傷度と考えるのが適切である³⁾。一方、D 法は式(4)の低サイクル疲労寿命式から定められた照査式で、3回のL2地震動の作用に対しても低サイクル疲労破断が生じないことを照査する照査法である。CID 法の載荷プログラムは、米国 AISC、日本建築センター等⁵⁾で建築フレーム構造を対象として基準化されている。以下、正負等振幅の交番ひずみ載荷を対象として、CID と D の相互関係を求める。構成則は、バイリニア移動硬化則(図-1, 2)を仮定する。

式(4)の累積疲労損傷限界 N_f は、表-1 の平均値相当の定数 ($C=18.5$, $m=1.95$) を用いると次のようになる。

$$N_f = 0.0541 / \Delta \varepsilon^{1.95} \quad (5)$$

また、一定ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon$ で N サイクル載荷したときの CID は図-2 より $CID = N \cdot 2(\Delta \varepsilon - 2\varepsilon_y)$ であるので、 $(CID)_{lim}=0.7$ に達するときの繰り返し数 $N_{CID=0.7}$ (累積塑性変形限界) は次のようになる。

$$N_{CID=0.7} = 0.35 / (\Delta \varepsilon - 2\varepsilon_y) \quad (6)$$

図-3 は降伏ひずみ ε_y が 0.15% の時の式(5), (6)を比較したものである。 $N_{CID=0.7}$ は N_f に比べてかなり小さく、限界ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon_u = 2\varepsilon_u = 0.06$ 以下では、 $N_{CID=0.7}$ は N_f の 1/2 以下である。従って、CID 法は D 法に比べかなり安全側の照査式であることが分かる³⁾。

4. $(CID)_{lim}$ の載荷プログラム規定 (Loading protocol)

繰り返し載荷実験により BRB が保有する性能を求める場合には、載荷プログラムが必要である。D 法では一定ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon$ による低サイクル疲労寿命実験から求められる $\Delta \varepsilon - N_f$ 関係から最小 2 乗法により式(4)の定数 C , m が定められる。それに対し、CID 法では、限界ひずみ ε_u に至るまでの変動ひずみ範囲の載荷実験によって性能 $(CID)_{lim}$ が定められるが、土木分野では載荷プログラムの明確な規定はない。日本建築センター(BCJ)の規定⁵⁾は、限界ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon_u$ の値が本報告と同一の 6% で、載荷プログラムもひずみ範囲 $\Delta \varepsilon$ で規定されているため、この規定を参考に表-2 の載荷プログラムを提案する。載荷番号①～⑦の 7 段階の両振りひずみ振幅での均一繰り返し(uniform-loading)サイクルを $n_0=0, 1, 2, 3$ または 4 サイクル、最終載荷⑦の $\Delta \varepsilon=6\%$ では、さらに n_m サイクルの付加繰り返し(additional-loading)を行い、荷重低下が 10%あるいは低サイクル疲労発生点での CID を $(CID)_{lim}$ とする。なお、提案規定(Proposed)は、日本建築センターの規定(BCJ)⁵⁾に④および⑥の載荷を加えたものである。図-4 は表-2 の載荷プログラムによって求められた $n_0 - n_m$ 関係($\varepsilon_y=0.15\%$)を図示したもので、CID は $(CID)_{lim}=0.7$ に達するまで、D は $D=1.0$ に達するまでの付加繰り返し数 n_m を n_0 に対してプロットしたものである。例えば、 $n_0=1$ の場合、CID=0.7 に達するサイクル数 n_m は、提案載荷規定では 3 回 (総サイクル数 $n_t=10$)、BCJ の規定では 4 回 ($n_t=11$)である。また、 $n_0=1$ で $D=1.0$ に達するのは、 $n_m=11 \sim 12$ 回 ($n_t=18 \sim 19$)である。均一繰り返しサイクル数 n_0 は任意に選べば良いが、提案法では、 $n_0 > 2$ で n_m は負となることから、 $n_0=1$ または 2 が望ましい。

5. あとがき

BRB を例に取り、低サイクル疲労照査で用いられる CID 法と D 法の相互比較を行い、CID の載荷プログラムを提案した。その結果、(1) CID 法は D 法に比べかなり安全側の照査法である、(2) CID 法での載荷プログラムは表-2 の規定で $n_0=1$ または 2 程度が望ましい、などが分かった。なお、低サイクル疲労実験での一定ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon$ のプログラムについては触れなかったが、表-2 の $\Delta \varepsilon$ の値を用いるのが CID 法との整合性の点から良いと思われる。

参考文献：1) 宇佐美勉：橋梁と基礎，pp.25-30, 2016。2) 宇佐美勉：第 10 回地震時保有耐力法シンポジウム，pp.11-22, 2007。3) 宇佐美勉ら：構造工学論文集，Vol.56A, pp.486-498, 2010。4) 舟山淳起ら：構造工学論文集，Vol.58A, pp.448-458, 2012。5) Takeuchi, T. and Wada, A. (ed.): Buckling-Restrained Braces and Applications, JSSI, 2017。

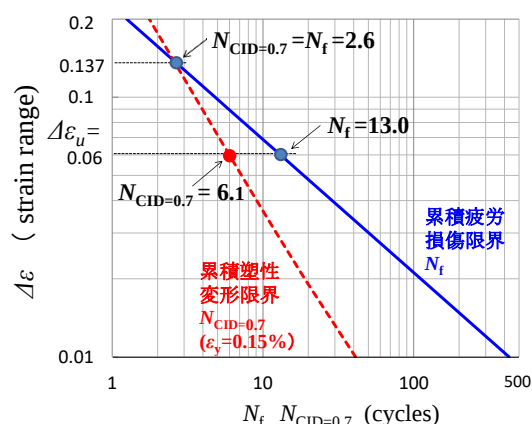


図-3 累積疲労損傷限界と累積塑性変形限界

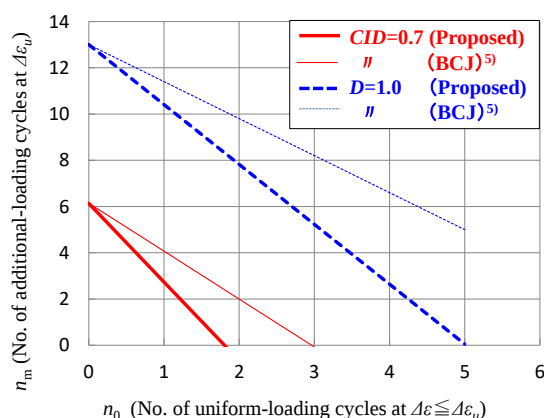


図-4 $n_0 - n_m$ 関係の比較 ($\varepsilon_y=0.15\%$)